

Las bóvedas irregulares del tratado de Vandelvira. Estrategias góticas en cantería renacentista

Rosa Senent Domínguez

El manuscrito de cantería de Alonso de Vandelvira (1575-1591) es uno de los primeros textos especializado en el arte de la monte. El texto original no ha llegado hasta nosotros, no obstante se conservan dos copias del mismo, una en la Biblioteca Nacional de España, obra de Felipe Lázaro de Goiti fechada en 1646, y otra en la Biblioteca de la Escuela de Arquitectura de Madrid, fechada a principios del siglo XVII, tradicionalmente atribuida a Bartolomé Sombrigo y Salcedo.¹

Esta comunicación aborda el análisis de las bóvedas sobre *figuras irregulares*: el *rombo igual* y el *rombo desigual*, contenidas en los dos últimos capítulos del ejemplar conservado en la Biblioteca de la Escuela de Arquitectura (Títulos 140 y 141) y que no aparecen en el ejemplar de la Biblioteca Nacional. Llama la atención en esta última parte del tratado el hecho de que en cada título Vandelvira dibuje tres soluciones distintas, al contrario de lo que sucede en el resto del manuscrito; sorprende además, que en ambos títulos la primera de las tres soluciones propuestas sea una bóveda de crucería.²

Vandelvira ya ha planteado una bóveda de crucería de planta cuadrada en el Título 112, «De las jarras»; pero mientras que en aquella a ocasión la bóveda de crucería se coloca a continuación de las capillas cuadradas, resueltas a la romana, en las dos *figuras irregulares* la bóveda de crucería es el primer ejemplo a tratar. Si hacemos caso de las palabras del propio autor, según el cual «Porque de grado en gra-

do se ha de ir prosiguiendo de las cosas más fáciles a las más dificultosas» (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 45, fol. 6v), este orden no sería casual.

Esta combinación de bóvedas de crucería, de tradición gótica, con otras de factura renacentista, ilustra una situación que se dio en España en los siglos XVI y XVII durante los cuales se siguieron construyendo en España bóvedas de crucería pese a que ya se habían adoptado las formas renacentistas importadas de Italia. Tradicionalmente consideradas como un anacronismo, las bóvedas de crucería renacentistas representan una evolución desde las bóvedas de crucería gótica, con las que tienen notables diferencias, a las bóvedas baídas renacentistas.³

El interés por las *figuras irregulares* del manuscrito de Vandelvira, que hasta ahora no habían sido estudiadas sino parcialmente (Alonso y Calvo, 2007), se debe al hecho de haber constatado que las conclusiones a las que se ha llegado sobre construcción de bóvedas históricas son fruto de estudios sobre formas regulares, canónicas;⁴ es en aquellos casos en los que la bóveda se aparta del canon y se ve obligada a deformar su planta, cuando aparecen en juego estrategias distintas de las inicialmente esperadas. El análisis de las distintas soluciones de bóvedas no-canónicas propuestas por Vandelvira, y compararlas con las soluciones canónicas que ya han sido estudiadas (Palacios, 2003), ha permitido constatar la pervivencia de estrategias góticas en la cantería renacentista y cómo la separación entre ambas técnicas

constructivas no es tan radical como tradicionalmente se ha venido considerando.

TÍTULO C «CAPILLA DESIGUAL POR HILADAS CUADRADAS»

Tras haber explicado las distintas variantes de *capilla en vuelta redonda*, sobre planta circular o semicircular, y las capillas de planta oval, Vandelvira dedica veinticinco capítulos del manuscrito a las bóvedas sobre *figuras regulares*; a excepción de las dos primeras, dedicados a la *capilla por arista*, las restantes soluciones son bóvedas baídas resueltas por diferentes procedimientos.⁵ En su uso de la bóveda baída, Vandelvira llega al extremo de proponer una bóveda de crucería de apariencia gótica que no es sino una «bóveda baída con un dovelaje dispuesto en «vuelta de horno», la cual va decorada con una nervadura a la manera gótica» (Palacios 2003, 287).

Dentro de estas *figuras regulares*, el Título 100 está dedicado a la «Capilla desigual por hiladas cuadradas», figura que en la actualidad consideraríamos un cuadrilátero irregular pero que Vandelvira incluye dentro de las *figuras regulares* de acuerdo con la definición que ha dado en el Título 1, según la cual una figura es *regular* cuando queda inscrita en una circunferencia, e *irregular* aquellas «que no son contenidas o contingentes a un círculo con todos sus ángulos» (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 42-43, fol. 5r).

Esta distinción entre figuras regulares e irregulares puede parecer arbitraria si nos basamos únicamente en conceptos geométricos, sin embargo se hace evidente al considerarlo desde un punto de vista constructivo. El intradós de una bóveda baída es el resultado de cortar una superficie esférica por planos verticales; por este motivo, siempre que la figura quede inscrita en una circunferencia será posible encontrar una superficie esférica que defina el intradós de la bóveda y por lo tanto será posible construir una bóveda baída.

El cuadrilátero desigual descrito por Vandelvira (figura 1) es una bóveda baída; la superficie de intradós es una esfera que circunscribe la planta y la única dificultad consistirá en la obtención de las plantillas. Vandelvira dibuja la solución de hiladas rectas, paralelas al perímetro de la planta, que permite una mejor adaptación al contorno *desigual*; también propone, aunque no dibuja, la solución con despiece en hiladas redondas.

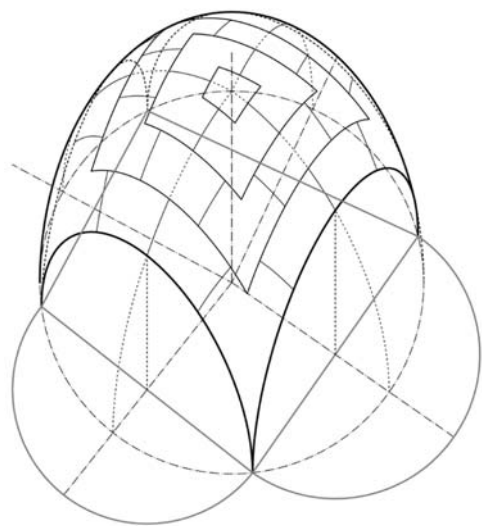


Figura 1
Capilla desigual por hiladas cuadradas

TÍTULO CXXXX «DEL ROMBO IGUAL»⁶

El *rombo igual* que aborda Vandelvira es un paralelogramo que tiene sus cuatro lados iguales y los ángulos desiguales, en el que las dos diagonales son perpendiculares entre sí. En el caso concreto dibujado en el tratado, la planta está compuesta por dos triángulos equiláteros, circunstancia que aprovecha para proponer una primera solución por medio de dos bóvedas baídas de planta triangular por hiladas cuadradas o redondas. A continuación plantea tres soluciones distintas para esta bóveda, todas ellas basadas en la bóveda baída: una bóveda de crucería de cinco claves, una bóveda con hiladas curvas («cerrada a manera de capilla oval») y una bóveda por hiladas rectas.

La bóveda de crucería sobre rombo igual

De las tres variantes propuestas, la primera solución es una bóveda de crucería de apariencia gótica pero basada en la *orden romana* (figura 3), es decir en el arco de fi punto, tal y como ya ha explicado para la bóveda de crucería sobre planta cuadrada.⁷ El rampante es en

vuelta de la diagonal y en las claves el cruce de nervios se produce sin que haya *torteras* que oculten el cruce; con la condición, además, de que todos los arcos tengan su centro sobre la línea de imposta.

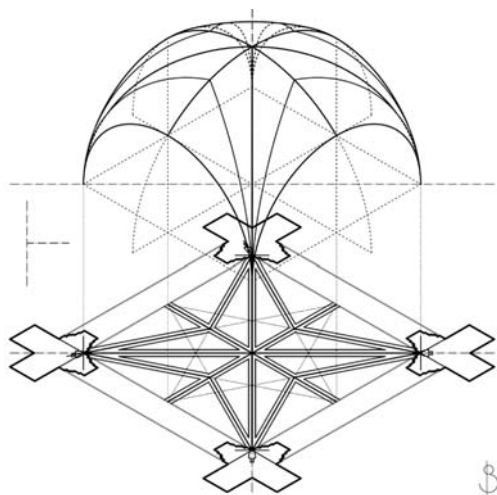


Figura 2
Bóveda de crucería sobre rombo igual

Los arcos formeros condicionan la construcción de los rampantes, que a su vez determinan el punto medio de la bóveda y por lo tanto la flecha de los arcos ojivos (*cruceros*) (figura 3). Éstos, al tener las proporciones condicionadas por la planta y el rampante, le obligan a recurrir al *arco painel*, que ha explicado al comienzo del tratado (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 56, fol. 18v) pero que no ha empleado hasta este momento. Los terceletes son arcos de circunferencia, dibujados a partir de dos puntos y situando su centro sobre la línea de imposta.

El rombo igual a manera de capilla oval

El punto de partida de esta bóveda (figura 4) es el trazado de la bóveda de crucería anterior. Conocidos los arcos formeros, rampantes y ojivos, el problema va a consistir en definir las hiladas y despieces de la bóveda, para lo que Vandelvira remite a la «Capilla oval tercera».⁸ Una primera hilada, contenida en un plano horizontal, separa las pechinas del casquete; como sus proporciones están fijadas, para trazarla emplea de nuevo al arco painel que le permite, además, que esta primera hilada sea tangente a los arcos formeros.

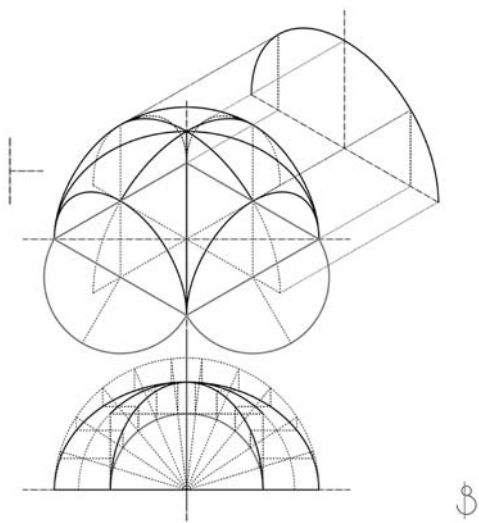


Figura 3
Obtención de los arcos rampante y ojivos para la definición de la geometría global de la superficie.

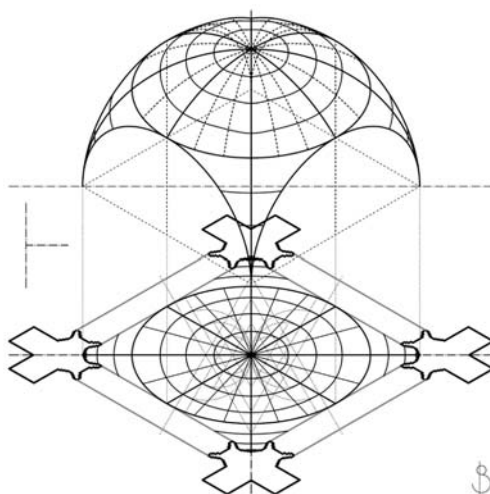


Figura 4
Rombo igual cerrado a manera de capilla oval

Al contrario de lo que sucede en la capilla oval tercera, las restantes hiladas se dibujan primero en planta, empleando el *arco carpanel*.⁹ A continuación se traza el despiece radial en planta y se traslada a la elevación como arcos de circunferencia.

El rombo igual por hiladas rectas

De nuevo esta bóveda toma como punto de partida el trazado de la bóveda de crucería. Conocidos los arcos formeros, rampantes y ojivos, el problema se va a centrar en definir las hiladas y despieces de la bóveda; conocidas estas curvas (*cerchas*) será posible construir la bóveda por un procedimiento similar al empleado en las capillas cuadrada y perlongada por hiladas rectas. Las hiladas, paralelas al perímetro, son arcos de circunferencia que unen tres puntos, dos sobre los ojivos y uno sobre el rampante, las juntas, dispuestas radialmente, son también arcos de circunferencia que unen los formeros con el punto medio de la bóveda.

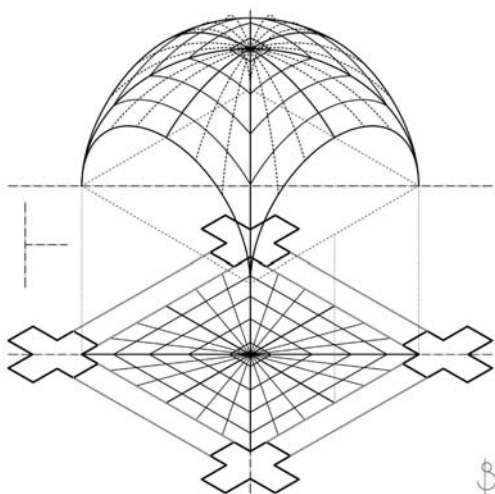


Figura 5
Rombo igual por hiladas rectas

TÍTULO CXXXXI. EL ROMBO DESIGUAL

En esta ocasión la figura resuelta se trata de un romboide, un paralelogramo de lados contiguos desiguales que puede entenderse como un rectángulo esviado. De nuevo propone tres soluciones distintas para esta bóveda: una bóveda de crucería de cinco claves, una bóveda por cruceros y una bóveda por hiladas rectas. Al contrario de lo que sucedía en el *rombo igual*, en el que la geometría global de las tres bóvedas era la misma, basada en las curvas obtenidas a partir de la bóveda de crucería, en el rombo desigual las tres bóvedas tienen una geometría distinta.

La bóveda de crucería sobre rombo desigual

El trazado de la bóveda de crucería (figura 6) sigue un procedimiento similar al empleado en el Título 140, con la única diferencia de que los arcos formeros no son iguales entre sí. Vandelvira no describe el procedimiento para trazar los ojivos, que podría suponerse igual al ya empleado en los casos anteriores por medio del arco painel.¹⁰

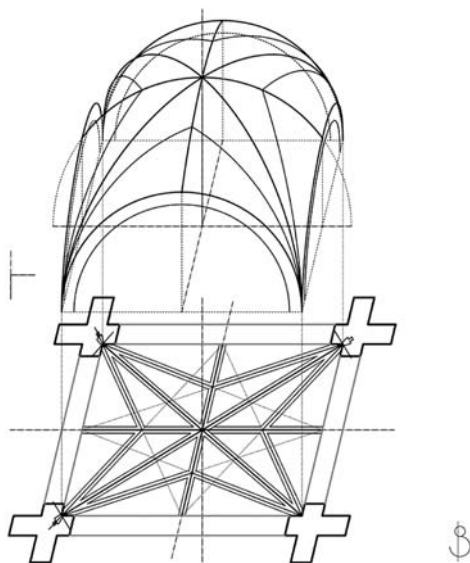


Figura 6
Bóveda de crucería sobre rombo desigual

El rombo desigual por cruceros

Esta bóveda (figura 7) sigue un planteamiento distinto, y no se apoya en el trazado de la bóveda de crucería anterior, aunque la superficie obtenida sí es la misma. En este caso son los nervios de la bóveda los que perfilan directamente la superficie, sin necesidad de hallar a priori los nervios rampantes y ojivos. El procedimiento es similar al empleado por Vandelvira en otras bóvedas baídas por cruceros, analizadas por Palacios (2003). Se definen dos familias de nervios, cada una de ellas paralela a dos lados opuestos del perímetro; cada familia está formada por arcos de circunferencia, apoyados en los formeros y con centro en la línea de imposta.

El rombo desigual por hiladas rectas

La dificultad de este trazado se incrementa al imponerse una condición más: los cuatro arcos formeros deben tener la misma altura, para lo que Vandelvira recurre de nuevo al *arco painel*, que empleará aquí hasta cuatro veces más. La estrategia seguida a conti-

nuación es similar a la seguida en los casos anteriores, dibujando los arcos rampantes y ojivos, y haciendo un despiece en hiladas rectas paralelas al perímetro; pero en esta ocasión para definir los arcos rampantes vuelve a emplear el *arco painel*, al igual que para los ojivos (figura 8). La explicación no es clara, no se explica porqué igualar la luz de los arcos rampantes a las de los ojivos, ni tampoco indica cómo determinar el punto medio de la bóveda, el rampante de menor luz está bien determinado, pero el otro no, ya que no se apoya sobre los arcos formos.¹¹

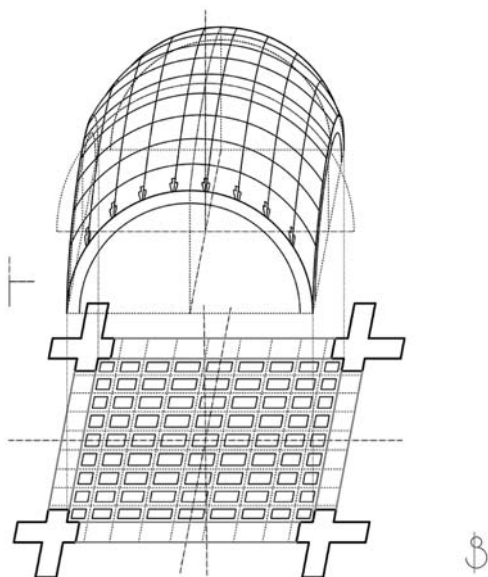


Figura 7
Rombo desigual por cruceros

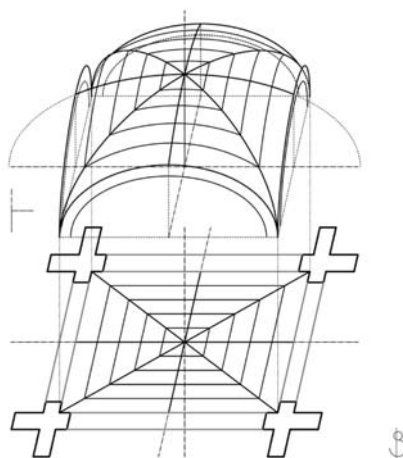


Figura 8
Rombo desigual por hiladas rectas

ANÁLISIS DE LOS TRAZADOS. LA ADAPTACIÓN DEL CANON

A diferencia de lo que encontramos en otros tratados de cantería, Vandelvira resuelve las *figuras irregulares* por medio de la bóveda baída.¹² El problema del rombo y del romboide, es que no es posible encontrar una superficie esférica que cubra la planta apoyándose en las cuatro esquinas, al contrario de lo que sucedía con el *cuadrilátero desigual*. Al deformar la esfera, de doble curvatura, para encajarla en una planta esviada, el resultado es una superficie que no podemos definir geométricamente a priori pero que,

según el propio Vandelvira, debe aproximarse a la bóveda baída:

Y así digo que toda capilla regular es cerrada en esfera recta, ya sea redonda ya sea cuadrada, aunque en diferentes cortes, mas la irregular por no poder ser cerrada en esfera recta es necesario buscarle cerchas de tal manera alducidas que venga a imitar todo lo que fuere posible la esfera recta que llamamos vuelta de horno acomodándose a los arcos a medio punto como lo manda la orden romana y porque las cerchas de esta capilla sean entendidas así las del rempante y cruceros como las de los terceletes, quise poner su muestra a manera de cinco claves porque entendidas sus cerchas con facilidad se podrá diferenciar de la orden que al Maestro le pareciere como adelante se dirá. (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 163, fol. 123v)

La estrategia que Vandelvira propone para las dos *figuras irregulares* es la misma, la geometría de la superficie de la bóveda se construye a partir de una serie de curvas (*cerchas*). En primer lugar se trazan las *cerchas* de definen la forma global de la bóveda: arcos formeros, que delimitan el perímetro, arcos rampantes, que discurren por el espinazo de la bóveda uniendo los puntos medios de los formeros, y arcos ojivos sobre las diagonales. Partiendo de la forma global de la bóveda, construida a partir de estas cerchas, se traza el resto de la superficie, de nuevo por medio de curvas: los terceletes en el caso de las bóvedas de crucería, y las hiladas y las juntas en los otros casos. Todas las curvas de la superficie, a excepción de aquellas que tienen sus proporciones condicionadas, son arcos de circunferencia conocidos tres puntos (o dos, y situando su centro sobre la línea de imposta).

En general Vandelvira remite a las bóvedas canónicas para lo relativo a la labra de las dovelas, pero con una diferencia significativa en lo que se refiere a la bóveda de crucería. En el caso de las bóvedas de crucería góticas, la labra de las claves (*crucetas*) se produce desde el trasdós, mientras que en el caso de la bóveda de crucería renacentista la labra de las *crucetas* se efectúa a partir de la plantilla de intradós.¹³ Tal y como ha señalado Rabasa (2000, 188-190); al explicar el *rombo desigual* Vandelvira precisa que «toda capilla que fuere en vuelta de horno, se han de trazar sus crucetas por la dovela, más siendo moderna u irregular hanse de trazar por las tardosas» (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 165, fol. 124r [sin numerar]). El problema de las bóvedas sobre *figuras irregulares* es que la superficie de intradós no es una superficie manejable con los métodos empleados en

cantería y a única forma de labrar las crucetas es proceder por el método gótico de labra desde el trasdós, que no precisa conocer ni desarrollar la superficie.

En realidad la geometría global de la superficie de intradós en el caso del *rombo igual* sí la podemos definir matemáticamente ya que se trata de un elipsoide escaleno (figura 9).¹⁴ Esto, que se produce porque la planta en un rombo, no pasa de ser una curiosidad; Vandelvira emplea siempre que puede el arco de circunferencia, en determinados casos estas circunferencias coinciden con las superficie del elipsoide (rampantes, hiladas paralelas al perímetro) y en otros no, como es el caso de las juntas radiales o los terceletes.¹⁵

Santiago Huerta ha señalado que estos trazados parecen ejercicios teóricos (Huerta 2007, 230); si bien las dos soluciones de bóveda de crucería no son irrazonables¹⁶, los errores e inexactitudes que encontramos en las otras soluciones llevan a pensar que efectivamente nunca fueron empleados. El interés de estos trazados no radica tanto en su aplicación real como en la forma en que Vandelvira aplica una serie de conocimientos que habían sido desarrollados y experimentados para bóvedas sobre planta cuadrada o rectangular (canónicas), a una situación distinta de aquella para la que fueron concebidos. Estrategias como la de definir el rampante antes que el ojivo no

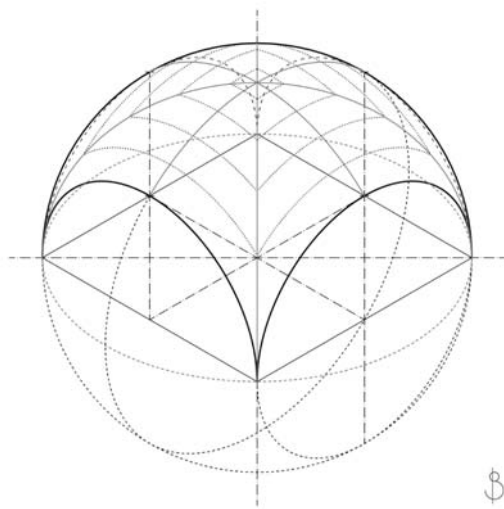


Figura 9
Elipsoide escaleno construido a partir de los arcos formeros, rampantes y ojivos en el Título 140

se hacen evidentes en bóvedas baídas sobre planta cuadrada o rectangular, donde ambos nervios son arcos de la misma circunferencia.

La bóveda de arista, con la que autores posteriores resolvieron el problema de las plantas esviadas, es más sencilla de construir y seguramente fue la que se aplicó cuando fue necesaria. Tal y como el mismo Vandelvira señala al referirse al *rombo igual* por hiladas rectas «Si de las trazas pasadas no se tiene conocimientos, por imposible tengo entender ésta por ser de tantos puntos y líneas» (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 163, fol. 122v).

UNA APOSTILLA SOBRE EL ÚLTIMO DIBUJO

Al final de tratado, bajo el dibujo del rombo desigual por hiladas cuadradas, Vandelvira realiza un apunte, al que se refiere como *figura H* (figura 10), cuando propone resolver la misma bóveda *cerrada en figura oval*.¹⁷ El dibujo describe la construcción de un óvalo inscrito en un paralelogramo no rectángulo tomando como punto de partida una circunferencia inscrita en un cuadrado sobre la que aplica una transformación

afín; la deformación de la retícula le permite obtener puntos de la nueva curva que después unirá con arcos de circunferencia («de tres en tres puntos») o a mano alzada («alduciendo la cercha con la mano»).

Esta solución, que permite adaptar la circunferencia a un paralelogramo no rectángulo, es inédita hasta el momento (López 2009, 256-257)¹⁸ y responde a un trazado de una elipse a partir de dos diámetros conjugados (por transformación afín de una circunferencia); «un problema que ni siquiera se plantean en los tratados y manuscritos de cantería renacentistas y barrocos» (Alonso y Calvo 2007, 14). Podría llamarnos la atención el hecho de que no se refiera a este dibujo al resolver las seis capillas ovales que propone, ni tan siquiera en el *rombo igual* como alternativa al trazado de hiladas que ha realizado por medio de óvalos. La explicación es sencilla: hasta este momento no ha necesitado recurrir a esta construcción. Vandelvira emplea indistintamente óvalos (*arco carpanel*) o elipses (*arco painel*), recurre al óvalos de cuatro centros siempre que puede, y al arco painel cuando no le queda otra opción, pero en esta ocasión el esviaje de la planta no le permite recurrir ni a uno ni a otro, por lo que inventa un trazado distinto (figura 11).

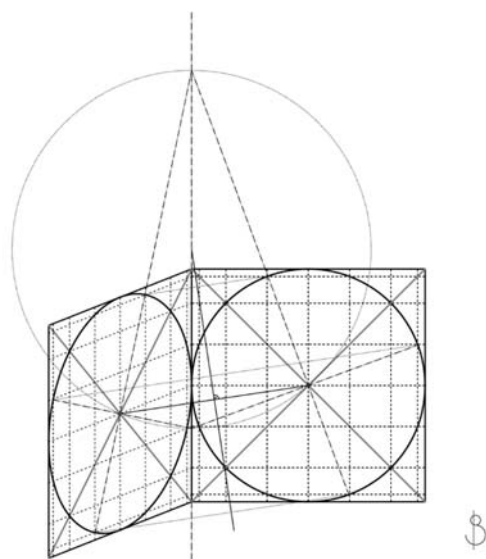


Figura 10
Trazado de la Figura H (Vandelvira s.XVII, fol. 124v) con la construcción que sería necesaria para determinar los ejes

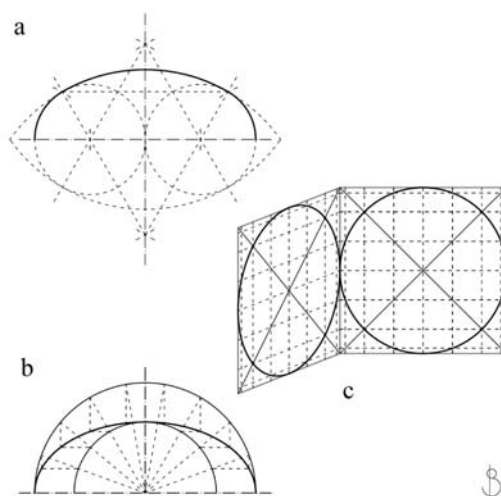


Figura 11
Los tres trazados dibujados por Vandelvira: (a) arco carpanel, (b) arco painel y (c) Figura H

El *arco carpanel* le permite resolver aquellos casos en los que las condiciones de contorno no están fijadas; empleará este arco para construir sus seis bóvedas ovales y las hiladas ovales del *rombo igual*. El *arco painel* le permite resolver aquellas situaciones en las que las condiciones de contorno sí están fijadas; tal es el caso de los arcos ojivos de las bóvedas de los Títulos 140 y 141, donde los rampantes determinan la construcción de los ojivos, y en la primera hilada del *rombo igual cerrado a manera de capilla oval*, cuyo trazado está condicionado y exige además que sea tangente a los formeros. En cambio, para el caso del *rombo desigual* por hiladas ovales, cualquiera de las soluciones anteriores pasaría por definir los ejes de simetría, y esta construcción no es en absoluto evidente (ver figura 10). La solución propuesta resuelve un problema muy concreto que no puede abordar por ninguno de los procedimientos de que dispone hasta ese momento.¹⁹

Esta solución podría estar inspirada en dibujos como el de Hernán Ruiz (ca.1550, fol. 23r y fol. 41v),²⁰ donde también se obtiene un óvalo por transformación afin de una circunferencia, si bien ésta no contempla el esviaje del cuadrado circunscrito. El único trazado análogo al de Vandelvira lo encontramos en los *Cuatro libros sobre la proporción huma-*

na de Alberto Durero (1528), en una serie de dibujos en los que partiendo del dibujo de una cara humana proporcionada, la deforma controlándola a partir de una cuadrícula (figura 12). Es muy poco probable que exista una relación directa entre los dibujos de Vandelvira y Durero; parece, más bien, que ambos autores hayan llegado a una solución, sin duda ingeniosa para resolver la transformación de una figura.

CONCLUSIONES

Tradicionalmente se ha considerado que la diferencia fundamental entre las bóvedas góticas y las bóvedas renacentistas es que las primeras se basan en el trazado de curvas, mientras que las segundas se basan en la concepción de superficies. El análisis de los seis ejemplos de bóvedas sobre *figuras irregulares* que Vandelvira recoge en su manuscrito, son un claro ejemplo de lo limitado de esta idea y ha permitido constatar la pervivencia de mecanismos de control geométrico propios de la tradición gótica en un tratado de cantería renacentista.

Cuando Vandelvira se enfrenta a una planta deformada, intenta recurrir a la solución de bóveda baída sobre la que ha edificado buena parte del tratado, pero adaptándola a la planta deformada; para ello se ve obligado a trazar, antes de nada, una serie de curvas que le permitan primero definir y luego controlar la superficie. Esta estrategia, que responde al mecanismo de construcción de las nervaduras góticas, se manifiesta hasta el extremo de que la primera bóveda que dibuja es la de crucería. De este modo se explica la organización de esta parte del tratado, aparentemente contradictoria si lo comparamos con el resto del manuscrito donde la bóveda de crucería se dejaba para el final. Cuando Vandelvira ordena las bóvedas sobre *figuras irregulares* empezando por el ejemplo de la bóveda de crucería no lo hace porque se fie más, estructuralmente hablando, de la bóveda de crucería reforzada por nervios, lo hace porque necesita la bóveda de crucería para poder definir y controlar estas superficies. La bóveda es *romana* pero la estrategia de control geométrico es gótica.

Esto ahonda en una idea que ya han señalado algunos autores (Alonso et al. 2009, 36); para levantar una bóveda es imprescindible disponer de herramientas que nos permitan controlar su forma durante las fases de proyecto y construcción, la única forma de

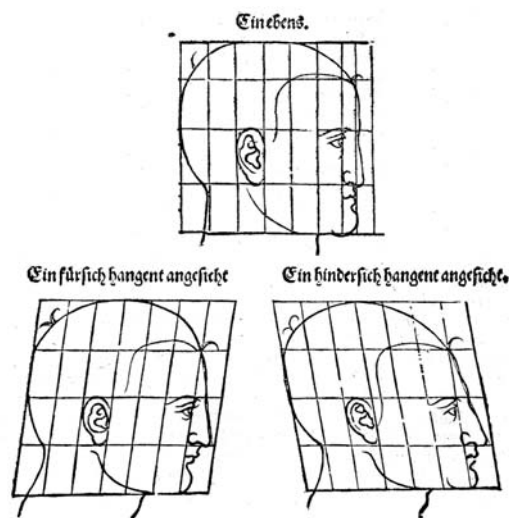


Figura 12
Dibujos de un rostros de perfil (Durero 1528, 150 y 160)

controlar una superficie es a partir de líneas contenidas en dicha superficie.

Esto se hace patente al estudiar una bóveda no-canónica, como las bóvedas pseudo-baídas que Vandelvira propone. Si la bóveda baída se levanta sobre una planta cuadrada, en la que rampantes y ojivos son arcos de una misma circunferencia, el orden de las operaciones no influye ya que al final todo coincide; en cambio, cuando la bóveda se deforma viéndose obligada a adaptarse a una solución no-canónica, es cuando la estrategia en juego se hace evidente.

NOTAS

1. Este trabajo se ha realizado a partir de la transcripción del texto realizada por Geneviève Barbé Coquelin de Lisle (Vandelvira [1575-1591] 1977), y de la versión digitalizada del manuscrito de la Biblioteca de la Escuela de Arquitectura (Vandelvira s.XVII).
2. Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación «Construcción en piedra de cantería en los ámbitos mediterráneo y atlántico. Análisis de ejemplos construidos» (BIA2009-14350-C02-01) del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación.
3. Las bóvedas de crucería renacentistas han sido estudiadas por algunos autores como Rabasa (1996), Gómez (1998) o Palacios (2009).
4. Al hablar de bóvedas, se van a emplear los términos *canónica* (que se ajusta a un modelo de características perfectas) y *no-canónica* (bóveda que se adapta a una forma diferente a aquella para la que fue inicialmente concebida), que ponen en relación geometría y construcción; en lugar de los adjetivos *regular* e *irregular*, que se refieren únicamente a cuestiones de tipo geométrico, sin relación con la construcción.
5. El análisis de las bóvedas canónicas del tratado de Vandelvira fue llevado a cabo por José Carlos Palacios en su tesis doctoral *Invención y convención en las técnicas constructivas del renacimiento español: estereotomía renacentista del tratado de Vandelvira* leída en 1987 (Palacios, 2003).
6. Las *figuras irregulares* del tratado del Vandelvira están recogidas al final del manuscrito, de la copia conservada en la Biblioteca de la ETSAM. Estos folios, en particular los que se refieren al Título 140 relativo al *rombo igual*, están desordenados en la encuadernación actual, lo que hace difícil seguir el texto. El orden correcto sería:
T. 140-1: Bóveda de crucería sobre rombo igual: Fol.120v (dibujo), Fol.123v y Fol.121r (texto).
T. 140-2: Rombo igual cerrado a manera de capilla oval: Fol.122r (dibujo) y Fol.121v (texto).
T. 140-3: Rombo igual por hiladas rectas: Fol.123r (dibujo) y Fol.122v (texto).
T. 141-1: Bóveda de crucería sobre rombo desigual: Fol.124v (dibujo) y Fol.124r [sin numerar] (texto).
T. 141-2: Rombo desigual por cruceros: Fol.125r (dibujo) y Fol.125v (texto).
T. 141-3: Rombo desigual por hiladas rectas: Dibujo: Fol.126r (dibujo), Texto: Fol.126v (texto).
7. Sobre la bóveda de crucería de planta cuadrada de Vandelvira, y sus diferencias con las bóvedas góticas *a la francesa* véase Palacios (2003, 291-292). En particular, el tercelete no se sitúa en la bisectriz del ángulo formado por el ojivo y el formero, sino que tiende al punto medio del lado opuesto. Como ya han explicado Alonso y Calvo (2007, 13-14), el trazado de la bisectriz para las *figuras irregulares* sería complicado.
8. Para un análisis de las bóvedas ovales de Vandelvira véase Palacios (2003).
9. Que Vandelvira emplee arcos de cuatro centros, y no *arcos paineles* para construir las hiladas, es una hipótesis que se justifica por el hecho de que el trazado de estas hiladas con el *arco painel* exigiría la definición previa de sus dos ejes, pero el orden de las operaciones que describe no lo permite. En cambio, el *arco carpanel* de cuatro centros permite, una vez definido el eje mayor, obtener el eje menor; además el arco carpanel se ajusta con bastante aproximación a lo que encontramos en el dibujo, cosa que no sucede si se emplea el procedimiento de la capilla oval tercera (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 118-119). Para las proporciones habituales, la diferencia entre un óvalo y una elipse es muy pequeña (Huerta 2007, 217); un examen con lupa del manuscrito original, prestando atención a las construcciones auxiliares, podría confirmar o refutar esta hipótesis.
En el dibujo no aparece el desarrollo completo de las hiladas en elevación que, al contrario que lo que sucedía en la capilla oval tercera, no estarán contenidas en planos horizontales sino que serán curvas alabeadas en el espacio.
10. Según José Calvo López, que está preparando un artículo sobre el particular, en un examen con lupa del manuscrito se puede observar que las líneas auxiliares empleadas para dibujar los ojivos siguen, en efecto, el procedimiento del arco painel.
11. Un examen del manuscrito original, en especial de las construcciones auxiliares, podría aclarar bastantes aspectos confusos de este trazado y aportar más información sobre el uso que Vandelvira hace del *arco painel*.
12. Ningún otro autor contempla la bóveda baída sobre una *figura irregular* (rombo o romboide). Tan sólo los tratados de cantería de Mathurin Jousse (1642), François De-

- rand (1643) y Guarino Guarini (1737) recogen bóvedas baidas atípicas, sobre polígonos regulares; que quedan inscritos en una circunferencia y por lo tanto no plantean problemas especiales. Los demás autores resolverán las *figuras irregulares* por medio de bóvedas de arista, que al ser superficies regladas de curvatura simple no ofrecen las dificultades de la doble curvatura de la esfera.
13. Al tratarse de una superficie esférica, la labra de la dovelas puede realizarse por medio de la plantilla de intradós, siguiendo el procedimiento empleado para labrar las dovelas de una bóveda esférica (Rabasa, 1996), (Palacios 2003, 287-301).
 14. Las secciones producidas en una cuádrlica por planos paralelos son homotéticas. Por este motivo, los arcos rampantes (y las hiladas paralelas al perímetro en el despiece por hiladas rectas), que están contenidos en planos paralelos a los arcos formeros, son arcos de circunferencia contenidos en la superficie del elipsoide.
 15. Sobre bóvedas de planta oval y elíptica puede consultarse Rabasa (2000, 286-302).
 16. Alonso y Calvo (2007) han planteado, a partir de una única clave conservada, una hipótesis de reconstrucción de una bóveda de crucería sobre *rombo desigual* basándose en el trazado de Vandelvira.
 17. «La figura H demuestra de la manera que esta capilla se puede cerrar en figura oval, hase de hacer en cuadrado con el lado mayor y inscribir dentro un círculo y trazar aquellas tiras transversales en el dicho círculo, luego trazar la figura de la capilla al lado y traer aquellas líneas transversales como lo demandaren las líneas diagonales de la dicha figura e ir tomando de tres en tres puntos u alduciendo la cercha con la mano y de la manera que se traza esta hilada se han de trazar las demás» (Vandelvira [1575-1591] 1977, 1: 166, fol. 126v).
 18. Vandelvira emplea una construcción parecida, pero sólo con media circunferencia, en el Título 70 para construir la elevación de los arcos del *Caracol de emperadores* (Vandelvira s.XVII, fol. 55r, fig. E y F).
 19. Para un análisis sobre las formas ovales y elípticas en arquitectura véase Gentil (1996) y Huerta (2007).
 20. «Manera de sacar un obado por otra bia que no los delas otras pasadas que es por transferente» (Hernán Ruiz 1550, fol. 41v).
- Burgos Cathedral. En *Proceedings of the Third International Congress on Construction History: Brandenburg University of Technology Cottbus, Germany, 20th-24th May 2009*. 31-38. Cottbus: Brandenburg University of Technology
- Durero, Alberto. 1528. *Hierinn sind begriffen vier bücher von menschlicher Proportion*. Nüremberg.
- Gentil Baldrich, José María. 1996. La Traza Oval y la Sala Capitular de la Catedral de Sevilla. Una aproximación geométrica. En *Quatro edificios sevillanos*, editado por J.A. Ruiz de la Rosa, 73-147. Sevilla: Fundación F.I.D.A.S. del C.O.A. de Andalucía Occidental.
- Gómez Martínez, Javier. 1998. *El gótico español en la edad moderna: bóvedas de crucería*. Valladolid: Univ. de Valladolid.
- Ruiz el Joven, Hernán. ca.1550. *Libro de arquitectura*. Manuscrito. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura. (Versión digitalizada: Colección Digital de la UPM, <http://cdp.upm.es/>).
- Huerta Fernández, Santiago. 2007. Oval Domes: History, Geometry and Mechanics. *Nexus Network Journal*, 9. No. 2: 211-248.
- López Mozo, Ana. 2009. *Bóvedas de piedra del monasterio de El Escorial*. Tesis doctoral inédita. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- Palacios Gonzalo, José Carlos. [1991] 2003. *Trazas y cortes de la cantería en el renacimiento español*. 2ª ed. Madrid: Munilla-Lería.
- Palacios Gonzalo, José Carlos. 2009. *La cantería medieval. La construcción de la bóveda gótica española*. Madrid: Munilla-Lería.
- Rabasa Díaz, Enrique. 1996. Técnicas góticas y renacentistas en el trazado y la talla de las bóvedas de crucería españolas del s. XVI. En *Historia de la construcción (Actas del Primer Congreso Nacional, Madrid, 19-21 de septiembre de 1996)*, editado por Casas Gómez, A.; S. Huerta Fernández y E. Rabasa Díaz, 423-433. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU.
- Rabasa Díaz, Enrique. 2000. *Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*. Madrid: Akal.
- Rabasa Díaz, E. y J. Calvo López. [2007] 2009. Gothic and Renaissance design strategies in stonecutting. En *Creating shapes in civil and naval architecture. A cross-disciplinary comparison*, editado por H. Nowacki y W. Leffevrep. 2009. 167-191. Leiden-Boston: Brill.
- Vandelvira, Alonso de. [1575-1591] 1977. *Tratado de arquitectura*. Editado por Geneviève Barbé-Coquelin de Lisle. Albacete: Caja Provincial de Ahorros.
- Vandelvira, Alonso de. s.XVII. *Libro de Traças de cortes de Pedras*. Manuscrito. Madrid: Escuela Técnica Superior de Arquitectura. (Versión digitalizada: Colección Digital de la UPM, <http://cdp.upm.es/>)

LISTA DE REFERENCIAS

- Alonso Rodríguez, M.A. y J. Calvo López. 2007. *Una clave de bóveda de la iglesia de Santa Catalina de Valencia*. Valencia: GothicMed (<http://www.gothicmed.es>).
- Alonso Rodríguez, M.A. et al. 2009. Functionalism and Caprice in Stonecutting. The Case of the Nativity Chapel in